

(علمی - ترویجی)

## کاربرد ژنراتور مگنتوهیدرودینامیک در تخلیه تنش

هدف این مقاله بررسی فناوری هیدرودینامیک مغناطیسی در ایجاد زلزله‌های مصنوعی است. برای این منظور، ابتدا به امکان بیان مکانیزم الکتروجنشی برای زلزله‌های مصنوعی پرداخته شده است. سپس، عملکرد سیستم ایجاد این زلزله‌ها و تأثیر آن با استفاده از این فناوری بررسی شده است. همچنین، کاربرد این نوع زلزله‌های مصنوعی تشریح شده است. در ادامه، با استفاده از تجربیات میدانی و آزمایشگاهی، به نتایجی درخصوص تخلیه تنش‌های تکتونیکی با پالس‌های الکتریکی پر قدرت برای کاهش خطرات زلزله اشاره شده است. پس از آن، این فناوری و نحوه عملکرد آن توصیف و در ادامه مقدار تنش‌های تکتونیکی پوسته زمین و تخلیه آن‌ها با استفاده از ژنراتور قدرت بالای هیدرودینامیک مغناطیسی و یافتن گسل‌های جدید اندازه‌گیری شده است. در انتها، نمونه‌ای از ایجاد زلزله مصنوعی با استفاده از این روش توصیف و بررسی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** هیدرودینامیک مغناطیسی، زلزله مصنوعی، تنش تکتونیکی، گسل زلزله

فتح اله امی<sup>۱</sup>، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس  
 کوروس نکوفر<sup>۲\*</sup>، استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس

\* نویسنده مخاطب، آدرس: چالوس،  
 کدپستی: ۳۹۷/۴۶۶۱۵

### Investigation of Magneto hydrodynamics Technology and It's Application in Tension Drain

The purpose of this paper is to investigate the magneto hydrodynamics technology in creating artificial earthquakes. For this purpose, the possibility of expressing the electronegative mechanism for artificial earthquakes is first discussed. Then, the mechanism of such earthquakes and their impact, using this technology has been investigated. Also, application of these artificial earthquakes is described. As follows, using field and laboratory experiments, the results of tectonic tensions with high power pulses to reduce earthquake hazards have been addressed. Subsequently, the description of this technology and its mechanism and further the measurement of the tectonic stresses of the earth's crust and its evacuation, using a magneto hydrodynamic high power generator, have been made. Finally, an example of the creation of an artificial earthquake is mentioned and examined.

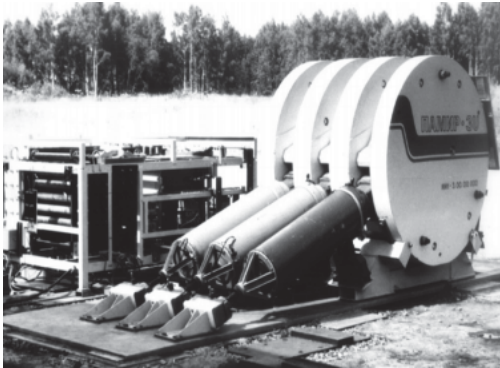
**Keywords:** Magneto hydrodynamics, Artificial Earthquake, Tectonic Stress, Fault

F. Ommi<sup>1</sup>, Professor, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University

K. Nekoufar<sup>2\*</sup>, Assistant Professor, Islamic Azad University of Chalus

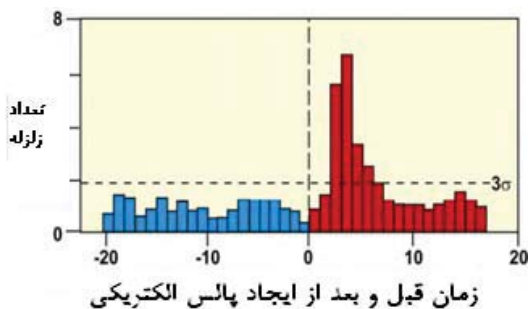
\*Corresponding Author, Postal Code: 397/46615, Chalus, IRAN  
 nekoufar@iauc.ac.ir

## مقدمه



شکل (۱): ژنراتور پالسی ۱۵۰۰ مگاآمپر در قرقیزستان [۴].

زیاد شدن تعداد زلزله‌ها چند روز بعد از هر تزریق شروع شده (مطابق شکل ۲، پس از ۲ روز) و تا حدود ۵ روز ادامه یافته است. زلزله‌ها معمولاً در امتداد مناطق معروف گسلی رخ داده است. در محلی که زلزله‌ها در امتداد مناطق معروف گسلی توزیع نشده است، مناطق گسلی جدید ممکن است ترسیم شود. بزرگی زلزله‌های مصنوعی ناشی از تزریق توسط دستگاه مولد مگنتوهیدرودینامیک بیش از ۵ ریشتر است [۴].



شکل (۲): زلزله‌های اتفاق افتاده ۲ تا ۷ روز پس از شلیک مگنتوهیدرودینامیک [۴].

پائول گلاور<sup>۱</sup>، پروفیسور پتروفیزیک دانشگاه لاول<sup>۲</sup> کبک<sup>۳</sup> پیشنهاد کرد که مکانیزم الکتروجنیسی<sup>۴</sup> ممکن است عاملی باشد که توانایی ایجاد زلزله‌ها را داشته باشد و تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است. منظور از مکانیزم الکتروجنیسی، استفاده از انرژی جریان الکتریکی (انرژی الکتروجنیسی) و تخلیه حجم عظیمی از این انرژی در زمان کم به داخل زمین است. در نظریه وی، جریان تزریق شده به ایجاد میدان الکتریکی سه‌بعدی در سطح زیرین منجر می‌شود. مکانیزم الکتروجنیسی از میدان الکتریکی

مگنتوهیدرودینامیک زمینه‌ای نظری است که به مطالعه دینامیک سیالات با خاصیت رسانایی الکتریکی می‌پردازد. پلاسماها، فلزات مایع و آب شور یا الکترولیت‌ها، مثال‌هایی از این نوع سیالات هستند. مفهوم اساسی در این مسائل میدان‌های مغناطیسی است که می‌تواند در سیال رسانای متحرک جریان القا کند و سبب ایجاد نیروهایی در سیال و نیز تغییر در میدان مغناطیسی شود [۱]. در این حالت، از نوشتن معادلات جریان سیال به طور کامل صرف نظر خواهد شد و تنها از معادله سیال غیرلزج (معادلات اولر) به اضافه جملات مغناطیسی استفاده می‌شود. این روند برای برجسته کردن اثرات مغناطیسی کفایت می‌کند و برای بسیاری از کاربردها نیز از دقت مناسبی برخوردار است [۲].

کاربرد اصلی مگنتوهیدرودینامیک در فیزیک پلاسما است. دو کاربرد فناورانه برای مگنتوهیدرودینامیک تعریف شده است که ممکن است در آینده بسیار مهم شوند. در کاربرد نخست، میدان‌های مغناطیسی قوی برای محدود کردن حلقه‌ها و ستون‌های پلاسماهای داغ استفاده می‌شود که در صورتی که بتوان در زمان کافی برای وقوع گداخت حرارتی هسته‌ای این عمل را انجام داد، می‌توان برای تولید قدرت بسیار بالا از آن استفاده کرد. در کاربرد دوم که هدف مشابهی را دنبال می‌کند، فلزات مایع برای تولید الکتریسیته از میان یک میدان مغناطیسی حرکت داده می‌شود که از این طریق نیز انرژی تولید خواهد شد. از دیگر کاربردهای مطالعه هیدرودینامیک مغناطیسی می‌توان به کاربرد گسترده آن برای توصیف فضا (درون منظومه شمسی) و پلاسماهای فیزیک نجومی (ورای منظومه شمسی) نیز اشاره کرد [۳].

### بررسی به‌کارگیری مکانیزم الکتروجنیسی برای ایجاد زلزله‌های مصنوعی

پژوهشگران مؤسسه دماهای بالا از آکادمی علوم روسیه، آزمایش‌های تزریق جریان را با استفاده از دو قطبی طویل ۴/۲ کیلومتری در ایستگاه تحقیقات بیشکک در منطقه دره‌ای چو از کوه‌های قرقیزستان (شمال تیان شان) انجام داده‌اند. این جریان با استفاده از مولدهای جریان پالسی مگنتوهیدرودینامیک (ژنراتور ایجاد جریان پالسی) تولید شده است که می‌تواند ۲,۸۰۰ آمپر را با ۱,۳۵۰ ولت به مدت ۱۲/۱ ثانیه تولید کند (شکل ۱). این پژوهشگران دریافتند که تعداد زلزله‌ها در این منطقه در ۱۵۰ کیلومتری منطقه تزریق تا ۱۰ انحراف استاندارد از مقدار لرزه‌خیزی اولیه افزایش می‌یابد. احتمال این اتفاق در هر هزار میلیون میلیون (۱,۰۱۵) برابر یک است. بنابراین، می‌توان با تزریق جریان ایجاد زلزله کرد. با این حال، امروزه هیچ مکانیزم فیزیکی قابل قبولی برای این مورد مشخص نشده است [۴].

1. Pavel Glaver  
2. Laval University  
3. Quebec  
4. Electro-Kinetic

زیادی از جریانات تزریقی را با دی‌پلی به طول ۵ کیلومتر در بیشکک به کار گرفتند، تعداد زلزله‌هایی را پیدا کردند که ناحیه‌ای به پهنا ۱۵۰ کیلومتر سایت تزریق شده است، میزان انحراف  $\sigma$  بالای ۱۰ از مقدار استاندارد پیش‌زمینه لرزه‌خیزی بود. با گرفتن این مینا آمار نشان می‌دهد که میزان زلزله‌ها از ۳۵ تجاوز می‌کند. تنها یک زلزله از ۴۰۰ زلزله به وجود آمده به این جریانات تزریقی (القایی) در زمین بستگی نداشته است. یعنی احتمال آنکه زلزله‌ای به غیر از این میکروزلزله‌ها رخ دهد، خیلی کم و در حدود هر  $10^{15}$  سال ۱ زلزله است [۶].

افزایش زلزله‌ها از چند روز بعد از تزریق (تقریباً ۵ روز بعد) شروع می‌شود، زلزله‌های اصلی روی گسل‌ها مشاهده می‌شود. در حقیقت، لغزش بر گسل‌ها را راه‌اندازی و تحریک می‌کند. در این دسته آزمایش‌ها، زلزله مصنوعی بزرگی برابر ۵ ریشتر<sup>۹</sup> دارد. ایجاد این زلزله‌ها با هدف کم کردن انرژی نهفته در زمین و آزاد کردن انرژی ذخیره شده انجام می‌شود [۶].

تنها مزیت این روش، به‌کارگیری آن در مقیاس‌های کوچک است. حداقل مزیت این روش در دریافت اطلاعات جدید در خصوص فرایند زلزله است. پروفیسور گلاور پیشنهاد کرد که ممکن است مکانیزم الکتروجنشی فاقد ارتباط علمی باشد. در تئوری او، جریان تزریقی از یک میدان سه‌بعدی الکتریکی در زیر سطح ایجاد می‌شود. در مکانیزم الکتروجنشی، میدان الکتریکی برای حرکت مایع در حفره استفاده می‌شود. اگر مایع در حفره در ناحیه گسل حرکت کند، ممکن است فشار مایع درون حفره واقع در ناحیه گسل بالا برود. با افزایش فشار مایع حفره واقع در گسل نسبت به فشار بحرانی (که ۰/۰۵ مگاپاسکال است)، اگر تنش کافی در گسل ذخیره شده باشد، زلزله اتفاق می‌افتد. تغییرات فشار از مثبت به منفی به سرعت اتفاق می‌افتد و در حالت منفی آرام‌تر حرکت می‌کند. ثابت شده است که اگر فشار مایع کافی باشد در فاصله حدود ۱۵۰ کیلومتری از نقطه تزریق زلزله ایجاد می‌شود. در حال حاضر، پیش‌بینی می‌شود که نتیجه به‌کارگیری سیستم مگنتوهیدرودینامیک می‌تواند گامی در جهت مدیریت فعالیت لرزه‌ای باشد و می‌تواند از وقایع فاجعه‌بار جلوگیری کند [۶].

### عملکرد سیستم ایجاد زلزله و تأثیر آن

در مکانیزم ایجاد زلزله در تیان‌شان، از مولدهای پالس جریان مگنتوهیدرودینامیکی در میدان‌های مغناطیسی بهره‌برداری شده است که جریان‌های الکتریکی بالا توسط حرکت پلاسما ایجاد شده است. مطابق شکل ۱، این جریان‌ها از سه کانال بزرگ

برای حرکت سیال منفذ در عمق استفاده می‌کند. سیال منفذ، سیالی است که در حفره‌های پوسته زمین قرار دارد و بسته به نقاط مختلف نوع آن فرق می‌کند و در برخی نقاط آب و در برخی نقاط دیگر نفت و دیگر مایعات می‌باشد. اگر سیال منفذ به منطقه گسل جریان یابد، ممکن است فشار سیال منفذ در منطقه گسل تجمع و به طور موقت افزایش یابد. طبق نظریه گلاور در صورتی که گسل دارای فشار متراکم کافی باشد، افزایش فشار سیال منفذ در مناطق گسل بیش از فشار بحرانی ۰/۰۵ مگاپاسکال برای رها شدن زلزله کافی است. بنابراین، اگر فشار سیال منفذ بیش از فشار بحرانی باشد، ممکن است زلزله رخ دهد. تاکنون مطالعات بسیاری در خصوص محرک الکتروجنشی در جهان انجام شده است، اما هنوز مشخص نیست که این مکانیزم بتواند فشارهای سیال کافی برای رها کردن زلزله تا ۱۵۰ کیلومتری از نقطه تزریق را ایجاد کند [۴].

در این مطالعه به مدل‌سازی عددی دوبعدی<sup>۵</sup> مکانیزم پیشنهادی تأثیر این جریانات با استفاده از روش المان محدود<sup>۶</sup> و با استفاده از بسته نرم‌افزاری کامسول مالی فیزیک<sup>۷</sup> اشاره می‌شود. این مدل‌سازی تنها قادر به تولید فشار گذرای شبه‌آنی است و نمی‌توان توسط آن فشار گذرا با تغییرات زمانی زیاد را شبیه‌سازی کرد. از این‌رو، در نتایج مدل تأخیر واضحی در داده‌های آزمایش میدانی از دو روز بین تزریق جریان و وقوع زلزله وجود دارد. همانطور که در مرجع [۳] مطرح شده است در حال حاضر تحقیقات برای اضافه کردن این توانایی به مدل و شبیه‌سازی ادامه دارد [۵].

### نمونه‌ای از ایجاد زلزله مصنوعی

از کاربردهای ژنراتور مگنتوهیدرودینامیک پالسی، ایجاد زلزله‌های مصنوعی نیز می‌باشد. مگنتوهیدرودینامیک پالسی، مگنتوهیدرودینامیک با میدان مغناطیسی بسیار قوی به وسیله حرکت پلاسماست که جریان الکتریکی بالایی ایجاد می‌کند. ژنراتوری که زلزله مصنوعی ایجاد می‌کند ۲۸۰۰ آمپر از ۱۳۵۰ ولت در ۱۲ ثانیه جریان تولید می‌نماید، به این معنی که میزان انرژی تولیدی آن ۲۳ مگاژول است [۶]. اساس کار آن به این صورت است که سه کانال بلند پلاسما و حریق در طول حفره نارسانا<sup>۸</sup> قرار دارد و هرکدام با سیم‌پیچ‌های الکتریکی مدور پوشیده شده است. زمانی که پلاسما با سرعت بالا در طول حفره نارسانا در حرکت است، ژنراتور مؤلفه‌های عمودی میدان مغناطیسی قوی دارد که در جریان بوده و جریان الکتریکی بزرگی نیز در سیم‌پیچ در حرکت است. دانشمندان روسی تعداد

5. Two-dimensional

6. Finite Element Method

7. COMSOL Multiphysics

8. Non-conductor

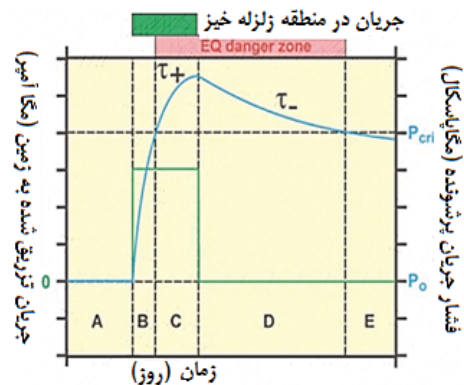
9. Deviation

10. Richter

در مدل گالیوم کری، ابتدا ساختار مدل یا به عبارت دیگر هندسه و شرایط مرزی تعیین شده است. سپس، معادلات دیفرانسیلی جریان سیال، جریان الکتریکی، کوپلینگ الکترومغناطیسی، تعادل جرم و اثرات گرمایی به طور موازی و کوپل شده<sup>۱۵</sup> به صورت دستگاه معادلات نوشته و حل شده است. شایان ذکر است حل با استفاده از روش المان محدود انجام می‌شود، به این معنی که کل هندسه به قسمت‌های بسیار کوچکتر تقسیم و در هر قسمت معادلات به دست‌آمده حل می‌شود. با این حال نتایج نشان می‌دهد فشار سیال در منفذ با فشار ۳ مگاپاسکال می‌تواند به آسانی با تزریق جریان ۱۵۰۰ آمپر به دست آید و تا ۱۵۰ کیلومتر از نقطه تزریق حفظ شود (شکل ۴). مدل‌سازی ذکر شده، اطلاعات تغییرات فشار سیال با زمان را شامل نخواهد شد. در این مدل فرض شده است که فشار و جریان در حالت جریان پایدار<sup>۱۶</sup> می‌باشد که این مورد از این جنبه اهمیت دارد که ممکن است فعال‌سازی مولد پالس مگنتوهیدرودینامیکی برای مدت تنها ۱۰ ثانیه برای رسیدن به حالت پایدار فشار ناکافی باشد و همان‌طور که مطرح شد در این زمان کوتاه، جریان هرگز به حالت پایدار نمی‌رسد. در این مدل‌سازی باید معادلات تابع فضا - زمان به طور هم‌زمان حل شوند. حل این معادلات دیفرانسیل به صورت تابع فضا و زمان بسیار پیچیده است. از این‌رو، انتظار می‌رود در آینده نزدیک راه‌حل‌های اولیه‌ای برای ساده‌سازی حل آن پیدا شود و تا آن زمان تنها می‌توان تأیید کرد که اتصال منبع برق به زمین خطرناک نیست و منجر به زلزله نمی‌شود [۴].

هر زمانی که زلزله رخ می‌دهد مقداری از فشار انرژی متراکم شده رها می‌شود. از این‌رو، اگر زلزله‌های کوچک تحت کنترل بتوانند در یک منطقه رخ دهد، ممکن است از تراکم فشار کاسته شود و وقوع زلزله با ریشتر بالا احتمال کمتری خواهد داشت. تولید مصنوعی زلزله ضعیف در برابر زلزله بزرگ پشتیبانی شده مشابه تلقیح واکسن است. در واکسیناسیون<sup>۱۷</sup>، وجود باکتری بیماری ضعیف شده سبب خواهد شد تا بدن پادتن‌ها<sup>۱۸</sup> را برای نبرد با حمله بیماری خطرناک گسترش دهد. تفاوت در این است که به جای تلقیح واکسن، انرژی به زمین تزریق می‌شود. از این‌رو، شاید بتوان از این شیوه برای رهاسازی زلزله بزرگی استفاده کرد که سر رسیده است و حداقل مزیتی برای تشخیص زلزله‌ای است که رخ می‌دهد. در صورتی که در مکانیزم شناخته‌شده که منجر به زلزله‌های مصنوعی می‌شود می‌توان با ایجاد چندین زلزله، به شناخت دقیق‌تری از مشخصات زمین‌شناختی دست یافت [۴].

پلاسمای<sup>۱۱</sup> تولید شده عبور می‌کند و از طریق قسمت غیررسانای مجرای عبور پلازما به بخش آتش نازل<sup>۱۲</sup> مولد جریان وارد می‌شود که رساناست [۱]. این بخش کانال پلازما که مجرای آتش نام دارد، توسط حلقه‌های الکتریکی موجود در محوطه بزرگ دایره‌ای شکل احاطه شده است و وظیفه تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی مگنتوهیدرودینامیک را بر عهده دارد. این سه مولد پالس مگنتوهیدرودینامیکی به طور موازی کنار هم قرار گرفته‌اند. زمانی که پلازما از طریق حفره غیررسانا با سرعت بالا حرکت می‌کند، میدان مغناطیسی شدیدی عمود بر این حرکت تولید می‌شود که به واسطه تأثیرات متقابل حرکت سیال یونیزه و میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی زیادی در حلقه‌ها تولید خواهد کرد [۴]. در شکل ۳ فشار سیال درون منفذ برحسب زمان با سرعت  $\tau+$  به سرعت افزایش یافته است، زیرا با محرک الکترومغناطیسی تحریک شده است. سپس، در طول زمان  $\tau-$  به آهستگی کاهش یافته است، زیرا فشار پس از مدت زمانی پخش می‌شود [۴].



شکل (۳): تغییرات تئوری فشار سیال تزریق‌شده برحسب جریان [۳].

وقوع زلزله در شرایطی امکان دارد که فشار سیال در منفذ در سطح بحرانی باشد. با وجود اینکه محرک الکترومغناطیسی در آزمایشگاه پتروفیزیک<sup>۱۳</sup> دانشگاه لاوال و دیگر آزمایشگاه‌های جهان تأیید شده است، تأثیرات این محرک در ایجاد فشارهای سیال کافی برای رهاسازی زلزله‌ها تا ۱۵۰ کیلومتر دورتر از نقطه تزریق تأیید نشده است. گالیوم کری<sup>۱۴</sup>، دانشجوی دانشگاه لاوال این فرایند را به طور عددی مطرح کرد. مدل‌های سطوح دو بُعدی وی در یک بسته نرم‌افزاری با نام کومسول مالتی فیزیک ایجاد شد [۴].

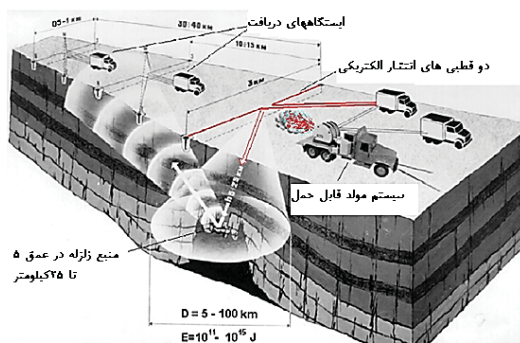
15. Coupled Equation  
16. Steady State  
17. Vaccination  
18. Antibody

11. Plasma  
12. Nozzle  
13. Petrophysics Laboratory  
14. Galium Cray

همچنین، با تحلیل امواج می‌توان به مشخصات تکتونیکی منطقه و سنگ‌های آن دست یافت که با تحلیل آن‌ها و نقشه گسل‌ها، الگوی لرزه‌ای در صورت وقوع زلزله قوی‌تر تعیین می‌شود [۷].

### آزمایش‌های میدانی در بررسی الکترومغناطیسی پوسته زمین

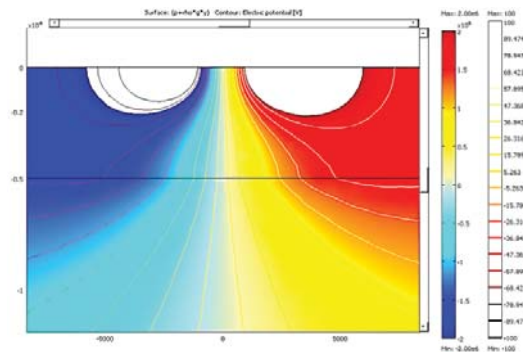
در مؤسسات آکادمی علوم روسیه (مؤسسه دماهای بالا، مؤسسه فیزیک زمین و ایستگاه تحقیقات در بیشکک، قرقیزستان) پوسته زمین در مناطق گرم<sup>۲۲</sup> (تاجیکستان) و بیشکک (قرقیزستان) بررسی الکترومغناطیسی شده و دلایل ژئوفیزیکی برای آشکار کردن پیش‌سازهای زلزله براساس تغییر پارامترهای الکتریکی سنگ‌ها قبل از حادثه لرزه‌ای قوی ارائه شده است (شکل ۵). پالس‌های الکترومغناطیسی پر قدرت ۲ الی ۱۰ ثانیه‌ای توسط مولدهای مگنتوهیدرودینامیک (شکل ۶) تولید و به یک دوقطبی که الکترودهای آن با فاصله ۴ کیلومتری در زمین نصب شده‌اند، به منظور انتشار جریان در زمین تزریق می‌شود. جریان الکتریکی حاصل از سیستم برق مگنتوهیدرودینامیک «پامیر-۲» در دوقطبی الکتریکی حدود ۲/۵ - ۳/۵ کیلوآمپر است [۷].



شکل (۵): شماتیک استفاده از مگنتوهیدرودینامیک برای ایجاد پالس‌های پوسته‌ای در تیان شان (۱۹۸۰) [۷].



شکل (۶): پالس ژنراتور استفاده‌شده در تیان شان [۷].



شکل (۴): مدل نشان‌دهنده پر شدن با سیال با فشار بیش از ۲ مگاپاسکال و ایجاد لایه‌های فشاری مختلف [۴].

### مطالعه تخلیه تنش‌های تکتونیکی با پالس‌های الکتریکی پر قدرت برای کاهش خطرات زلزله

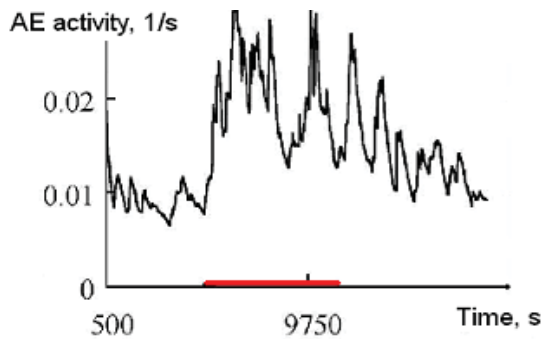
در این بخش مطالعات انجام شده درخصوص تخلیه تنش‌های تکتونیکی با پالس‌های الکتریکی پر قدرت برای کاهش خطرات زلزله بررسی خواهد شد. در ادامه معرفی روش تشخیص الگوهای لرزه‌ای، آزمایش‌های میدانی در بررسی الکترومغناطیسی پوسته زمین، تجربیات آزمایشگاهی و در نهایت دستاوردهای مطالعه بیان خواهد شد.

#### معرفی روش تشخیص الگوهای لرزه‌ای

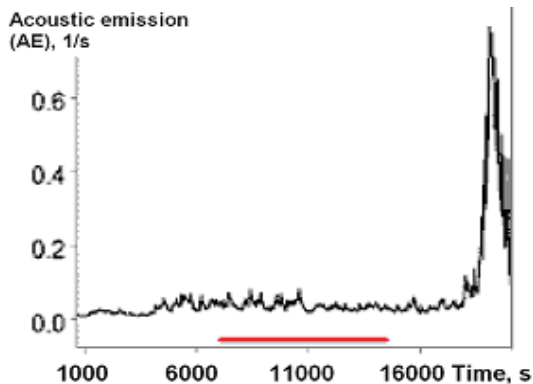
امروزه الگوهای لرزه‌ای زیادی وجود دارد که با اثرات مختلف طبیعی و دست‌ساز مانند جزر و مد ماه-خورشید، زمین لرزه قوی، طوفان مغناطیسی، تزریق مایع به گسل، توسعه میدان‌های نفتی و انفجار مواد شیمیایی<sup>۱۹</sup> / هسته‌ای<sup>۲۰</sup> زیرزمینی رها می‌شود. زلزله طبیعی و دست‌ساز به دلیل انتشار تنش تکتونیکی انباشته شده در پوسته زمین و تغییر جریان طبیعی لرزه‌ای رخ می‌دهد. در حال حاضر، جدیدترین روش ایجاد زلزله مصنوعی، ایجاد زلزله توسط پالس‌های الکترومغناطیسی سیستم برق مگنتوهیدرودینامیک است [۷]. در ترکیب عوامل طبیعی رها شده این پدیده ممکن است برای کنترل فعالیت لرزه‌ای و پیشگیری از حوادث لرزه‌ای فاجعه بار در نظر گرفته شود. تخلیه الکترومغناطیس کنترل شده دارای مزیت‌های آشکار فراوانی در مقایسه با ابزارهای تحریک/رها سازی دیگر مانند انفجار پر قدرت، ارتعاشات<sup>۲۱</sup> و... از جمله کنترل آسان و سازگاری آن با محیط زیست است [۴]. در این روش با ایجاد زلزله مصنوعی و ثبت مشخصات لرزه‌ای می‌توان نقشه گسل‌ها را تعیین کرد.

19. Chemical  
20. Nuclear  
21. Vibration

شده در نمونه تست می‌باشد. دو روش از اقدام الکتریکی مشخص شد: ۱- توالی پالس تکراری با مکث بین پالس‌ها و ۲- تک‌پالس الکتریکی. اثر الکتریکی منجر به افزایش فعالیت صوتی در هر دو مورد می‌شود [۷]. با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ و با استفاده از نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل آماری تجربیات میدانی و تست آزمایشگاهی مشخص می‌شود که استفاده از پالس الکترومغناطیسی پر قدرت برای کنترل زلزله با تنظیم جریان لرزه‌ای و انتشار انرژی انباشته شده در پوسته زمین به شکل حوادث لرزه‌ای بی‌خطر امکان‌پذیر است [۷].



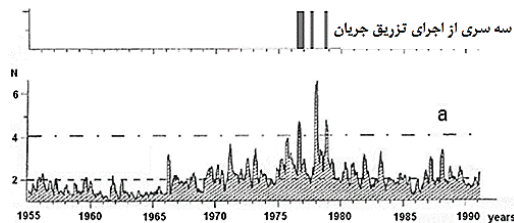
شکل (۹): انتشار آکوستیک برای پالس‌های عمودی سطحی ۴,۸۰۰ تا ۱۰,۸۰۰ ثانیه برحسب زمان [۷].



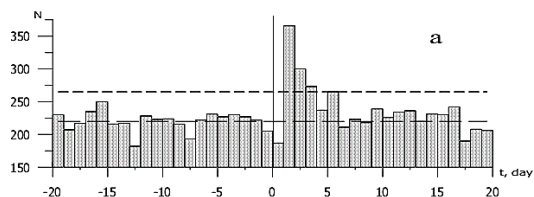
شکل (۱۰): انتشار آکوستیک برای پالس‌های عمودی در محدوده ۷,۰۰۰ تا ۱۵,۰۰۰ ثانیه برحسب زمان [۷].

از بررسی انتشار امواج پالس‌های عمودی و با توجه به برگشت انتشار امواج صوتی محدوده مورد آزمایش مشخص می‌شود که با گرانتیت سازگاری ندارد و در نتیجه، با استفاده از این روش و تست‌های مقایسه‌ای می‌توان به جنس سنگ بستر پی برد (در اینجا نمک گرانودیوریت). در ادامه با توجه به فرکانس بیشینه برگشت مشخص می‌شود که فرکانس عمودی سنگ در چه محدوده‌ای است. همچنین، از مقدار و تعداد

اثر پالس‌های الکترومغناطیسی پر قدرت مولد مگنتوهیدرودینامیک در روش لرزه‌ای در مناطق پامیر (شکل ۶) و شمال تیان شان (شکل ۷) کشف شده است. پس از آغاز به کار مولد مگنتوهیدرودینامیک، تعداد زلزله‌های محلی بسیار بیشتر از قبل شده است. افزایش سطح فعالیت لرزه‌ای طی ۳ تا ۶ روز پس از تزریق مشاهده می‌شود (شکل ۸). پیش‌بینی شده است که به دلیل فرایند تغییر شکل تکتونیکی، پالس‌های الکترومغناطیسی به تخلیه انرژی انباشته شده در پوسته زمین منجر می‌شود. به جای یک رویداد فاجعه‌بار، انرژی به صورت مجموعه‌ای از زلزله‌های نسبتاً ضعیف تخلیه می‌شود. تجزیه و تحلیل دقیق از لرزه‌خیزی شمال تیان شان نشان می‌دهد که تأثیر الکترومغناطیسی مولد مگنتوهیدرودینامیک منجر به تغییر روند لرزه‌ای در منطقه مطالعه شده و مناطق مجاور می‌شود [۷].



شکل (۷): نمودار تعداد زلزله‌های ایجاد شده به زمان با سه شلیک مولد مگنتوهیدرودینامیک [۷].



شکل (۸): تغییرات میانگین تعداد زلزله‌های روزانه قبل و بعد از تزریق جریان [۷].

### تجربیات آزمایشگاهی

برای تأیید نتایج میدانی و آشکارسازی مکانیزم احتمالی تعامل میدان الکترومغناطیسی با سنگ‌ها تحت شرایط استرس‌زا، آزمایش‌های مختلفی انجام شده است. این آزمایش‌ها تحت فشارده‌سازی دومی‌محوری نمونه‌های نمک گرانودیوریت<sup>۲۳</sup> و گرانتیت وسترلی<sup>۲۴</sup> انجام گرفته است. در مراحل مختلف بارگذاری نمونه‌های سنگ، انتشار صوتی<sup>۲۵</sup> اندازه‌گیری شده است که هر مرحله شامل چرخه‌های تکراری از اقدامات الکتریکی اعمال

23. Grandiorite  
24. Granite Westerly  
25. Acoustic Emission

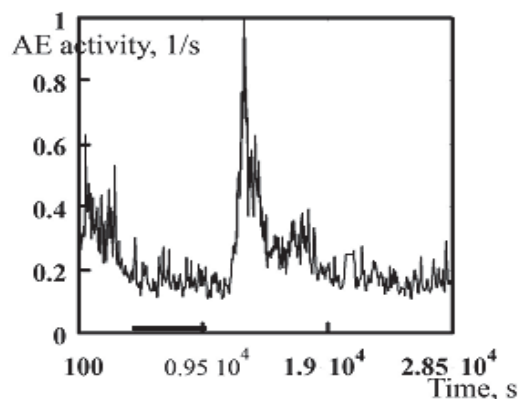
مکانیزم احتمالی تعامل میدان الکترومغناطیسی با سنگ‌های تحت فشارهای گسلی، آزمایش‌های مختلفی انجام شده است. آزمایش‌ها تحت فشرده‌سازی دو محوری در مدل‌های مناطق شناخته شده از نظر ساختار زمین‌شناختی و متشکل از شن و ماسه انجام شده است. در مراحل مختلف بارگذاری مدل‌ها، مجموعه‌ای از اندازه‌گیری صوتی انجام و هرکدام از اندازه‌گیری‌ها با تکرار ایجاد پالس الکتریکی، تکرار شد. دو حالت فعالیت الکتریکی مطالعه شده است: ۱- توالی پالس تکراری با مکث بین پالس و ۲- تک‌پالس الکتریکی. اثر الکتریکی به افزایش فعالیت صوتی در هر دو مورد منجر می‌شود. تمامی نتایج به دست آمده با آزمایش‌های میدانی و تجربیات آزمایشگاهی به امکان استفاده از پالس‌های الکترومغناطیسی برای کنترل زلزله با تنظیم جریان لرزه‌ای و انتشار انرژی انباشته شده در پوسته زمین در قالب حوادث ضعیف لرزه‌ای اشاره می‌کند [۷]. بنابراین، می‌توان نتایج به دست‌آمده از مطالعه را به صورت زیر فهرست کرد [۷]:

- فعالیت لرزه‌ای مناطق ژئوفیزیکی گرم و بیشکک تأثیر پالس‌های الکتریکی پر قدرت را در جریان لرزه‌ای نشان می‌دهد،
- تجربیات آزمایشگاهی تأثیر پالس‌های الکتریکی بر شدت انتشار صوتی نمونه‌های سنگی را تحت حالت نیمه پایدار اثبات می‌کند،
- برآورد انرژی، مبنای فرضیه مکانیزم رهاسازی تأثیر پالس‌های الکتریکی را ارائه می‌کند،
- برای تشخیص ماهیت فیزیکی به آزمایش‌های میدانی و آزمایش کشف پدیده‌های اضافی نیاز است و
- ممکن است نتایج به دست آمده با عنوان پس زمینه ای برای توسعه فناوری کاهش خطر زلزله براساس انتشار تنش تکتونیکی با اعمال فیزیکی در پوسته زمین استفاده شود.

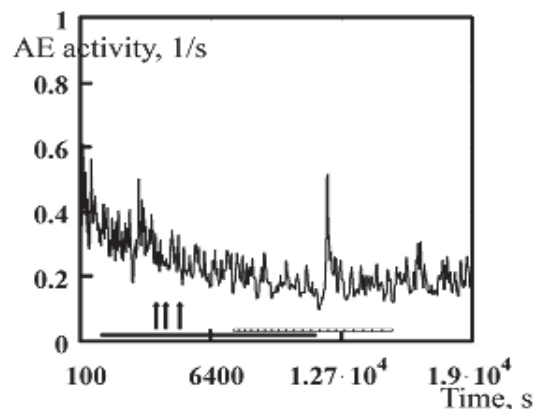
### فناوری ژنراتور هیدرودینامیک مغناطیسی در پیش‌بینی زلزله

در ژنراتور مگنتوهیدرودینامیک، انرژی حرارتی بدون واسطه (تبادل با انرژی مکانیکی) به انرژی برق تبدیل می‌شود. سوخت انواع اولیه آن، سوخت‌های فسیلی مانند نفت و زغال سنگ<sup>۲۶</sup>

پیک‌های نمودار نیز می‌توان به یا ناهمگونی و تعداد مؤلفه‌های ساختاری پی برد (شکل‌های ۱۲-۱۱) [۷].



شکل (۱۱): فعالیت انتشار صوتی گرانیب برحسب زمان [۷].



شکل (۱۲): فعالیت انتشار صوتی گرانیب در محدوده پالس‌های عمودی ۴۸۰۰ تا ۱۰۸۰۰ ثانیه برحسب زمان [۷].

### دستاوردهای مطالعه

در مطالعات مؤسسات آکادمی علوم روسیه، اثر پالس‌های الکترومغناطیسی پر قدرت مولد مگنتوهیدرودینامیک در روش لرزه‌ای در مناطق شمالی تیان شان و پامیر بررسی شده است [۷]. پس از آنکه مولد مگنتوهیدرودینامیک شروع به تزریق کرد، افزایش سطح فعالیت لرزه‌ای طی ۳ تا ۶ روز مشاهده و در نتیجه پیشنهاد شد که پالس‌های الکترومغناطیسی منجر به تخلیه انرژی انباشته شده پوسته زمین با توجه به فرایندهای تغییر شکل پوسته‌ای منجر خواهد شد و انرژی در قالب مجموعه‌ای از زلزله‌های نسبتاً ضعیف به جای یک حادثه فاجعه‌بار تخلیه می‌شود. در طول آزمایش‌های انجام شده توسط مولد پالس مگنتوهیدرودینامیک، سهم نسبی لرزش‌های بسیار ضعیف و چندتایی و به طور کلی، فعالیت لرزه‌ای در منطقه افزایش می‌یابد. برای تأیید نتایج میدانی و آشکارسازی

- (۱) پیش‌بینی عملیاتی مبتنی بر روش‌های پیش‌نشانگری و  
(۲) پیش‌بینی به روش‌های آماری-احتمالی و نمای کلی تحلیل داده‌ها.

به طور کلی، به هر پارامتری که قبل از وقوع زمین‌لرزه تغییراتی در آن پدید آید به صورتی که بتوان با بررسی دقیق این تغییرات، زمین‌لرزه را پیش‌بینی کرد، پیش‌نشانگر گفته می‌شود [۲]. تاکنون بیش از ۳۰ پیش‌نشانگر شناخته شده است که اهم آن‌ها عبارتند از: تغییر شکل پوسته زمین، تغییر در تراز دریا، کج‌شدگی، پیش‌نشانگرهای ژئو مغناطیسی و ژئوالکتریکی، تغییر در میدان گرانشی، پیش‌لرزه‌ها، انتشار گاز رادون<sup>۳۴</sup>، تغییر در دبی و ارتفاع آب‌های زیرزمینی، رفتار حیوانات و غیره.

در توصیف روش‌های بر مبنای روش آماری می‌توان چنین گفت که هر تجربه کارآمد پیش‌بینی به طور اجتناب‌ناپذیری نیازمند ثبت بی‌وقفه وقوع زلزله بزرگ و غیرمکرر در طول سالیان دراز می‌باشد. روند چنین یادداشت‌برداری‌هایی باید چنان واضح باشد که گروه‌های تحقیقاتی دیگر بتوانند آن را تکرار کنند و نتایج مناسب از نتیجه پیش‌گویی را به دست آورند. در همین موقع، این روندها باید از اشتباهات فردی مصون و به صورت جعبه سیاهی از الگوریتم باشد که در آن پارامترهای قابل تنظیم در این نوع الگوریتم‌ها ثابت باشد و تغییر نکند. مرجع داده‌های ورودی به خوبی تعریف شده است و الگوریتم باید به صورت خودکار ابهام‌های داده‌ها را رفع کند که با یک کار ساده تفاوت دارد. به این ترتیب می‌توان پذیرفت که به غیر از اقدام برای پیش‌بینی واقعی زمین‌لرزه‌ها، راه دیگری برای دستیابی به توجیه آماری منصفانه از یک روش پیش‌گویانه و یک الگوی پیش‌نشانگری وجود ندارد [۲]. روش‌های پیش‌بینی آماری احتمالاتی زمین‌لرزه بر پایه این ثبت‌ها و در حقیقت، بر مبنای کاتالوگ زلزله‌ها انجام می‌شود که برای مثال می‌توان از الگوی انفجار پس‌لرزه‌ها یا الگوی B، الگوریتم M8، الگوریتم M8S، الگوریتم CSM<sup>۳۵</sup>، الگوریتم CN و غیره نام برد [۲].

ایجاد انفجارهای مصنوعی به دلیل تخلیه انرژی نهفته زمین و مدیریت خطر زلزله کارگشاست. گرچه نتایج حاصله از این انفجارها با به‌کارگیری موازی دیگر اطلاعات لرزه‌ای منطقه در تعیین زمان زلزله بزرگ یاری‌کننده است. در حقیقت، ایجاد انفجار مصنوعی توسط این ژنراتور به طور مستقیم (تخلیه انرژی انباشته زمین) و غیر مستقیم (مطالعه اطلاعات حاصل از انفجار) در کاهش خطر زلزله مؤثر است. به طور کلی، برای پیش‌بینی

بود که با جایگزینی آنها با گاز، راندمان به مراتب بهبود یافت. اصول این دستگاه عبارتست از [۲]:

گازهای یونیزه<sup>۲۷</sup> گرم پلاسما که می‌توان آن‌ها را از احتراق سوخت‌های نفتی به دست آورد، از داخل یک میدان مغناطیسی عبور داده می‌شود. حرکت این یون‌های مثبت گازی در میدان مغناطیسی، الکتروسیسته دینامیک ایجاد می‌کند و به وسیله الکترودها (که به طور مناسب قرار داده شده است) جمع و به خارج هدایت می‌شود. جهت نیروهای مغناطیسی عمود بر مسیر گازها است. این ژنراتورها برق جریان دائمی تولید می‌نمایند که باید به وسیله مبدل‌های الکتریکی به جریان متناوب تبدیل شود. در داخل این ژنراتور می‌توان مسیر ذره را دنبال و تغییرات و تبدیلات را مطالعه کرد. این خصوصیت بارز آن‌هاست که موجب شده است تا در برخی از شاخه‌ها مانند فیزیک پلاسما<sup>۲۸</sup>، ژئوفیزیک<sup>۲۹</sup> و نجوم<sup>۳۰</sup> کاربردی شود [۲].

یکی از کاربردهای این ژنراتور در زمینه پیش‌بینی زلزله و مطالعات راهبردی در خصوص تغییرات ژئوفیزیکی است که با افزودن اطلاعات دیگر مانند میزان و شدت پیش‌لرزه‌ها، محققان را در اتخاذ تصمیم درست درباره زمان زلزله و مکان رویداد کمک می‌کند [۲]. در حقیقت، زمین‌لرزه پدیده‌ای است که بر اثر آزاد شدن ناگهانی انرژی ذخیره شده در سنگ‌های پوسته جامد زمین رخ می‌دهد. این انرژی ناشی از حرکت و فشار تدریجی و بسیار کند بخشی از پوسته زمین نسبت به بخشی دیگر در مجاورت آن است [۲]. از طرفی دیگر، زمین‌لرزه تکان خوردن پوسته زمین است. این تکان یا در نتیجه انفجار در اعماق زمین روی می‌دهد (انفجاری) یا در نتیجه فعالیت آتشفشان‌ها. گاهی نیز بر اثر لغزش لایه‌های مختلف زمین روی یکدیگر در طول گسل‌ها ایجاد می‌شود.

تعداد زلزله‌هایی که سالانه رخ می‌دهد به یک میلیون بار می‌رسد، اما از این میان فقط معدودی از آن‌ها اثرات مخرب وسیعی بر جای می‌گذارد. بعضی اوقات انرژی آزادشده در زلزله‌های بزرگ برابر با انرژی حاصل از انفجار ۱۸۰ میلیون پوند تی-ان-تی<sup>۳۱</sup> است. به عبارت دیگر، قدرت تخریبی<sup>۳۲</sup> این زمین‌لرزه‌ها ۱۰,۰۰۰ برابر قدرت نخستین بمب اتمی است که ایالات متحده در جنگ جهانی دوم در ژاپن<sup>۳۳</sup> منفجر کرد. به همین دلیل، تعیین زمان و مکان زلزله اهمیت زیادی دارد. اساس پیش‌بینی زلزله بر پایه دو گروه مطالعات بنا نهاده شده است [۲]:

27. Ionized
28. Plasma Physics
29. Geophysics
30. Astronomy
31. Tri-nitro-toluene
32. Destructive
33. Japan

34. Radon

35. Mendocian Scenario



یافتن گسل‌های جدید علاوه بر گسل‌های از قبل فعال می‌تواند به دانشمندان در پیش‌بینی بروز بالقوه زلزله‌ها در مکان‌های غیرمنتظره کمک کند. شواهد بی‌شماری در یک منطقه می‌تواند به وجود گسل‌هایی دلالت کند که برای مدت‌های بسیاری در زمان‌های اخیر حرکت نکرده است. این گسل‌ها در چشم‌انداز منطقه، برجستگی‌های مستقیم و طولانی تشکیل می‌دهد که می‌تواند توپوگرافی<sup>۳۴</sup> محلی و زهکشی طبیعی را تغییر دهد. بنابراین، گسل‌ها زمین‌های دارای چین‌خوردگی و دریاچه و حوضچه‌هایی تشکیل شده از انحنا زمین به سمت پایین به جای می‌گذارند. گسل‌ها می‌تواند محل ظهور چشمه‌ها باشند و به دلیل زهکشی طبیعی اغلب در طول مسیرشان از پوشش گیاهی انبوهی پوشیده شده‌اند. به وسیله بررسی‌های انعکاس امواج می‌توان گسل‌ها را شناسایی کرد که از طریق ثبت امواج یک شوک انفجاری انعکاس یافته از مرزهای لایه‌های پوسته زمین انجام می‌شود. گاهی به علت رخ دادن زلزله، صخره‌های واقع در طول خطوط گسل متلاشی می‌شود، تمامی یخچال‌ها و نهرها واقع در طول شکاف‌های حاصل به راه می‌افتد و ممکن است دره‌های بزرگی در طول یک گسل پوسته زمین به وجود آید [۶].

### بررسی تغییرات در سرعت امواج لرزه‌ای

یکی دیگر از کاربردهای این ژنراتور در شاخه ژئوفیزیک در زمینه زلزله‌شناسی به منظور بررسی انعکاس امواج لرزه‌ای حاصل از ایجاد زلزله‌های مصنوعی است [۶]. از علائم زلزله قریب‌الوقوع بررسی پیش‌لرزه‌هاست و همچنین، مطالعه تغییرات در سرعت امواج، حامل اطلاعات مفیدی برای کارشناسان در جهت پیش‌بینی زمان و مکان زلزله بزرگ است. تغییراتی که در سرعت امواج لرزه‌ای در صخره‌های تحت تنش قرار گرفته نزدیک به گسل یافت شده است نشان دهنده تغییر مواد تشکیل دهنده و شکل گسل می‌باشد. شکاف‌های ذره‌بینی در صخره تحت تنش قرار گرفته نسبت به جهتی که تنش بر آن‌ها وارد می‌شود، به هم می‌پیوندند و این امر می‌تواند بر چگونگی عبور لرزه‌ها خفیف از میان آن‌ها تأثیر بگذارد. با اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج لرزه‌ای و تعیین میزان تغییرات آن می‌توان به فعالیت گسل‌ها و تغییرات لایه‌های زمین پی برد [۶].

### نتیجه‌گیری

در این مقاله، فناوری هیدرودینامیک مغناطیسی برای تولید زلزله‌های مصنوعی با اهدافی از جمله کاهش خطرات ناشی از انباشت انرژی در پوسته زمین برای پیشگیری از زلزله‌های

زلزله و مطالعات زلزله‌شناسی و لرزه‌سنجی، ژنراتور مگنتوهیدرودینامیک می‌تواند از سه طریق کاربردی باشد [۲]:

- (۱) اندازه‌گیری میزان استرس‌های تکتونیکی پوسته زمین،
- (۲) بررسی تغییرات در سرعت امواج لرزه‌ای و
- (۳) یافتن گسل‌های جدید.

از جنبه دسته‌بندی‌های زلزله‌شناسی می‌توان این موارد را در گروه روش‌های پیش‌بینی به روش پیش‌نشانگری به منظور مدیریت خطر زلزله قرار داد.

## اندازه‌گیری میزان استرس‌های تکتونیکی پوسته زمین و تخلیه آن‌ها با ژنراتور قدرت بالای مگنتوهیدرودینامیک

یکی از موارد استفاده از فناوری مگنتوهیدرودینامیک، اندازه‌گیری تغییرات آکوستیکی پوسته زمین با هدف کاهش خطر زلزله است. استفاده از این مولد در منطقه تیان شان و کوه پامیر مطالعه و افزایش میزان سیگنال دریافتی و سطح فعالیت‌های لرزه‌خیزی منطقه از ۳ تا ۶ روز بعد از اجرای تزریق مشاهده شد. طرح براساس ایجاد پالس‌های الکترومغناطیسی پیشنهاد می‌شود که موجب تخلیه انرژی انباشته‌ای می‌شود که در شکاف‌های پوسته زمین در نتیجه فرایند تغییر شکل تکتونیکی ذخیره شده‌اند [۶].

### یافتن گسل‌های جدید

اغلب زمین‌لرزه‌ها در امتداد گسل‌های فعال رخ می‌دهد. از این‌رو، شناسایی گسل‌های فعال و نقشه‌برداری از آن‌ها «مناطق لرزه‌خیز» یا به عبارتی محل‌های وقوع زمین‌لرزه‌های احتمالی را مشخص می‌کند. گردآوری اطلاعات درباره زمین‌لرزه‌های گذشته یک منطقه و پیاده کردن آن‌ها روی نقشه سبب مشخص شدن هر چه بهتر مناطق خطر خواهد شد.

بررسی‌های آماری، فراوانی رخداد زمین‌لرزه‌ها در یک منطقه احتمال «دوره بازگشت» زمین‌لرزه با یک بزرگی مشخص را نشان می‌دهد و به همین دلیل جداولی برای بررسی زمین‌لرزه‌های ایران و جهان تنظیم شده است [۶]. برای مثال، اگر دوره بازگشت زمین‌لرزه‌های با بزرگی ۷ ریشتر در یک منطقه صد سال باشد، به این معنی است که در هر قرن یک زمین‌لرزه با بزرگی ۷ ریشتر ممکن است در آن منطقه اتفاق افتد. به این ترتیب هرچه از زمان وقوع زمین‌لرزه مخرب قبلی منطقه بگذرد، احتمال وقوع زمین‌لرزه مخرب بعدی بیشتر می‌شود. از آغاز قرن هجدهم تاکنون بیش از سه میلیارد نفر جان خود را در زمین‌لرزه‌ها از دست داده‌اند.

- Its Change under Effect of High Energy Electromagnetic Pulses", *Annals of Geophysics*, Vol. 47, No. 1, pp 199-212, 2004.
- [5] Cyr, G., Glover, P.W.J. and Novikov, V., "Can an Electro-kinetic Mechanism Explain Artificial Earthquakes?", *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12, EGU2010-2526, Vienna, May 2-7, 2010.
- [6] Avagimov, A.A., Tarasov, N.T., and Zeigarnik, V. A., "The Use of MHD Generators for Reduction of Earthquake Danger", *IUGG99*, Birmingham, England, 1999.
- [7] Zeigarnik, V. A., Novikov, V. A., Avagimov, A.A., Tarasov, N.T., and Bogomolov, L.M., "Discharge of Tectonic Stresses in the Earth Crust by High-Power Electric Pulses for Earthquake Hazard Mitigation", *The 2nd International Conference on Urban Disaster Reduction*, Taipei, Taiwan, November 27-29, 2007.

بزرگ، شناسایی گسل‌های جدید، پیش‌بینی زلزله و شناسایی تغییرات ژئوفیزیکی زمین بررسی شده است. همچنین، نتایج آزمایشگاهی تخلیه تنش‌های تکتونیکی با پالس‌های الکتریکی پر قدرت برای کاهش خطرات زلزله و نتایج میدانی (شکل ۷) نشان می‌دهد که فعالیت‌های لرزه‌ای زمین پس از تزریق پالس‌های الکتریکی به مقدار چشمگیری افزایش یافته است که خود نمایانگر تأثیر این پالس‌های الکتریکی بر ایجاد زلزله است و می‌توان از این روش برای ایجاد زلزله‌های مصنوعی بهره برد. از طرفی، این روش که جدیدترین روش برای ایجاد زلزله مصنوعی محسوب می‌شود نسبت به روش‌های دیگر مانند انفجار مواد شیمیایی<sup>۳۷</sup> / هسته‌ای<sup>۳۸</sup> زیرزمینی از نظر محیط زیستی کم‌خطرتر است. زیرا گازهای خطرناک سمی ناشی از انفجار مواد شیمیایی یا تشعشعات رادیواکتیو ناشی از انفجار مواد هسته‌ای را همراه ندارد و از این رو می‌توان از این روش به عنوان بهترین روش نیز یاد کرد.

در این مطالعه به مدل‌سازی عددی دو بُعدی<sup>۳۹</sup> مکانیزم پیشنهادی تأثیر این جریان‌ها با استفاده از روش المان محدود<sup>۴۰</sup> و با استفاده از بسته نرم‌افزاری کامسول مالتی فیزیک اشاره شد. نتایج اولیه امیدوارکننده است و نشان می‌دهد که:

- ۱) فشار گذرای بیشتر از فشار بحرانی می‌تواند به راحتی با این مکانیزم تولید شود،
- ۲) فشار گذرا در این مدل در فاصله بیش از ۲۰۰ متری الکتروود می‌تواند تا ۲ مگاپاسکال (۴۰ برابر مقدار بحرانی برای ایجاد زلزله) باشد و
- ۳) فشار گذرا بالاتر از مقدار بحرانی تا ۱۶۰ کیلومتری از دو قطبی حفظ می‌شود که سازگار با طیف وسیعی از آزمایش‌های میدانی است.

## مراجع

- [1] Qadiri Miandehi, M.S., Design and Calculation of a Magnetohydrodynamic Generator with 20 kw Power, (M. Sc. Thesis), Iran University of Science and Technology, Iran, 1995 (In Persian).
- [2] Gourdine, M.C., On Magnetohydrodynamic Flow over Solids, Ph.D. Dissertation, California Institute of Technology, 1960.
- [3] Panchenko, V. P., The Principle of Operation and the Definition of MHD Converters. Features, Advantages and Disadvantages, 1995 (In Russian).
- [4] Tarasov N.T., Tarasova N.V., "Spatial-Temporal Structure of Seismicity of the North Tien Shan and

37. Chemical

38. Nuclear

39. Two-dimensional

40. Finite Element Method